



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

GILSOMARO BARBOSA DE MELO SILVA

**MODELAGEM NUMÉRICA PARA ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO DE UMA VIGA
ENGASTADA**

CARAÚBAS/RN

2022

GILSOMARO BARBOSA DE MELO SILVA

**MODELAGEM NUMÉRICA PARA ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO DE UMA VIGA
ENGASTADA**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus Caraúbas como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador:

Prof^a. Dra. Rosilda Sousa Santos

Coorientador:

Prof. Dr. Diego David Silva Diniz

CARAÚBAS/RN

2022

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

B586m Barbosa de Melo Silva, Gilsomaro.
MODELAGEM NUMÉRICA PARA ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO
DE UMA VIGA ENGASTADA / Gilsomaro Barbosa de Melo
Silva. - 2022.
51 f. : il.

Orientador: Rosilda Sousa Santos.
Coorientador: Diego David Silva Diniz.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2022.

1. ANSYS Mechanical. 2. Deformação. 3. Simulação
numérica. 4. Método dos elementos finitos. I.
Sousa Santos, Rosilda, orient. II. David Silva
Diniz, Diego, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Caraúbas
Bibliotecária: Dalvanira Brito Rodrigues
CRB: 15/700

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

GILSOMARO BARBOSA DE MELO SILVA

**MODELAGEM NUMÉRICA PARA ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO DE UMA
VIGA ENGASTADA**

Trabalho de conclusão de curso
apresentada à Universidade Federal
Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel
Ciência e Tecnologia.

Aprovado: 18/06/2022

BANCA EXAMINADORA

ROSILDA SOUSA
SANTOS: [REDACTED]

Assinado de forma digital por ROSILDA
SOUSA SANTOS [REDACTED]
Dados: 2022.06.23 21:04:25 -03'00'

Prof.ª. Dra. Rosilda Sousa Santos
Orientadora

DIEGO DAVID
SILVA DINIZ: [REDACTED]

Assinado digitalmente por DIEGO DAVID SILVA DINIZ:
DN: CN=DIEGO DAVID SILVA DINIZ [REDACTED]
OU=UFERSA - Universidade Federal Rural do Semi-Árido,
O=COPEdu, C=BR
Razão: Eu estou aprovando este documento
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2022.06.23 10:21:44 -03'00'
Foxit PDF Reader Versão: 11.2.2

Prof. Dr. Diego David Silva Diniz
Coorientador

WALBER MEDEIROS
LIMA: [REDACTED]

Assinado de forma digital por
WALBER MEDEIROS
LIMA: [REDACTED]
Dados: 2022.06.23 18:21:49 -03'00'

Prof. Dr. Walber Medeiros Lima
Examinador Interno

JACKSON DE BRITO
SIMÕES: [REDACTED]

Assinado de forma digital por
JACKSON DE BRITO
SIMÕES [REDACTED]
Dados: 2022.06.23 20:12:28
-03'00'

Prof. Dr. Jackson de Brito Simões
Examinador Interno

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Jeová (Deus) por sempre está me concedendo forças para superar e seguir em frente apesar dos obstáculos, a minha amiga e esposa por sempre me apoiar em todas as minhas decisões e por me incentivar em todos os momentos. Aos meus pais Gilmar Domingos e Zélia Barbosa por terem me ensinado valores sublimes os quais pretendo leva-los comigo para sempre. A minha irmã Gilmara por sempre me ajudar e incentivar-me a continuar. Ao meu irmão Gilberto por sempre acreditar que um dia seria possível e me estimular. A minha cunhada Bruna por sempre ter me apoiado (In Memoriam). Não poderia deixar de mencionar a segunda família a qual a universidade me presenteou. Agradeço a todos os meus amigos, obrigado por todo cuidado, amor e companheirismo. Também sou grato a todos os meus familiares e amigos em geral que torceram e me incentivaram de alguma forma. Por fim, agradeço a todos os professores que me inspiram e me ensinam, em especial ao professor Dr. Diego e a professora Dr^a. Rosilda por terem aceitado a proposta de me orientar e me dar todo suporte necessário para o desenvolvimento desse trabalho.

Obrigado a todos!

RESUMO

A incansável busca por melhores condições de vida faz com que as pessoas encontrem nos recursos tecnológicos maneiras de equilibrar a relação trabalho/economia/segurança. Esses recursos tecnológicos têm sido aplicados com maior frequência na engenharia. Isso deve-se ao desenvolvimento dos softwares de simulação que proporciona maior viabilidade econômica na hora de fazer projetos de engenharia. Com o considerável crescimento no mercado de infraestruturas promoveu ainda mais a aplicação das vigas em projetos, ligado a isso está a preocupação com as deformações que lhes são causadas. Neste sentido foi avaliado a deformação sofrida por uma viga engastada via análise de estrutura por meio do software ANSYS Mechanical. A viga encontra-se engastada em uma das extremidades e apoiada por um suporte fixo na outra extremidade. A fim de promover a obtenção dos valores das deformações foi desenvolvida uma viga no ANSYS e logo após, encontrado sua deformação através dos métodos dos elementos finitos. Para verificar a eficácia da metodologia proposta no trabalho, realizou-se a comparação dos resultados numéricos através de dados obtidos por meio dos ensaios experimentais e dos cálculos teóricos. Através dos valores obtidos concluiu-se que os valores obtidos na simulação apresentam deformações muito semelhantes aos ensaios experimentais e do cálculo teórico.

Palavras-chave: ANSYS Mechanical, Deformação, Simulação numérica, Método dos elementos finitos.

ABSTRACT

The tireless quest for better living conditions makes people use technological resources as manners to balance a work/economy/safety relationship. Those technological resources have been applied more frequently in engineering. This is due to development of simulation software in order to provide greater economic viability in engineering projects. The considerable growth in the infrastructure market, further promoted the application of beams in projects, linked to this is the concern with the deformations that are caused to them. In this sense, the deformation suffered by a beam was evaluated via structure analysis using the ANSYS Mechanical software. The beam is at one extremity and supported by fixed support at the other extremity. To obtain the values of deformations a beam was developed in ANSYS, and after, the deformation was found through finite element methods. To verify the methodology effectiveness proposed in this study the numerical results were compared to data obtained in the tests and theoretical calculations. Through the values obtained, it was concluded that the values obtained in the simulation present deformations very similar to the tests and the theoretical calculation.

Keywords: ANSYS Mechanical. Deformations. Numerical simulation. Finite element methods.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Extensômetro de resistência elétrica. -----	19
Figura 2: Extensômetros uniaxiais simples: modelos AB e BA. -----	23
Figura 3: Extensômetros biaxiais (escama de peixe e de 90°).-----	24
Figura 4: Extensômetros triaxiais (0-45°-90° e 120° -----	24
Figura 5: Extensômetros triaxiais (0-45°-90° e 120°).-----	25
Figura 6: Sistema de codificação dos extensômetros.-----	25
Figura 7: Barra flexível -----	27
Figura 8: Ponte de Wheatstone. -----	29
Figura 9: Ponte de Wheatstone com um extensômetro.-----	30
Figura 10: Ponte de Wheatstone com dois extensômetros.-----	31
Figura 11: Ponte de Wheatstone com quatro extensômetros. -----	32
Figura 12: Barra flexível. -----	33
Figura 13: Comparação entre os valores de medições experimentais e teóricas.-----	34
Figura 14: Projeção da viga e suas dimensões. -----	37
Figura 15: Painel com características do material usado pelo ANSYS. -----	38
Figura 16: Malha rugosa (Grosseira), antes do refinamento. -----	39
Figura 17: Malha refinada. -----	40
Figura 18: Probe, ferramenta de medição de deformação. -----	42
Figura 19: Análises cores de tensões. -----	43
Figura 20: Análises cores de deformações totais. -----	43
Figura 21: Análises de cores de deformações, malha para coleta de dados. -----	44
Figura 22: Distância da Coleta de dados. -----	44
Figura 23: Comparação entre os valores de medições experimentais e teóricas.-----	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Médias das deformações experimentais teóricas.-----	33
Tabela 2: Médias das deformações experimentais e teóricas em comparação com a simulação. -----	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ERE	Extensômetros de Resistência Elétrica
CAE	Computer Aided Engineering: Engenharia Assistida por Computador
CAD	Computer Aided Design: Desenho Assistido por Computador
CFD	Computational Fluid Dynamics: Fluidodinâmica Computacional
FEA	Finite element analysis: Análises de Elementos Finitos
MEF	Método dos Elementos Finitos
RAM	Memória de Acesso Aleatório
HD	Disco Rígido
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
3D	3 Dimensões
LES	Laboratório de Engenharia e Simulação
APDL	Parametric Design Language

LISTA DE SÍMBOLOS

R	Resistência elétrica
ρ	Resistividade elétrica
A	Área
L	Comprimento
ΔR	Variação da resistência
$\Delta \rho$	Variação da resistividade
ΔA	Variação da área
ΔL	Variação do comprimento
ε	Deformação
ΔV	Variação do volume
c	Constante do material condutor
K	Fator de sensibilidade do extensômetro
E	Módulo de elasticidade dos materiais
σ	Tensão
I	Momento de inércia
M	Momento fletor
T	Espessura da barra
B	Largura da barra
P	Força
V_0	Tensão do sinal de saída
V_{EX}	Tensão elétrica contínua
R_G	Resistência elétrica do extensômetro
R_i	Resistencia elétrica inicial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	15
1.2	OBJETIVO GERAL	16
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.4	ESCOPO DO TRABALHO	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	MEDIÇÕES DE DEFORMAÇÃO	17
2.2	EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA (<i>STRAIN GAUGES</i>)	18
2.3	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	19
2.4	CLASSIFICAÇÃO	22
2.4.1	Material utilizado como elemento resistivo	22
2.4.2	Material utilizado como base	23
2.4.3	Configuração da grade	23
2.5	SISTEMA DE CODIFICAÇÃO	25
2.6	ESCOLHA ADEQUADA DO SENSOR	26
2.6.1	Dimensão	26
2.6.2	Geometria da grade	26
2.6.3	Tipo de extensômetro	26
2.7	DETERMINAÇÃO DA DEFORMAÇÃO DE UMA VIGA SIMPLEMENTE ENGASTADA	27
2.8	CIRCUITOS	28
2.8.1	Circuito com um extensômetro	29
2.8.2	Circuito com dois extensômetros	30
2.8.3	Circuito com quatro extensômetros	31
2.9	MÉTODO DOS QUATRO FIOS	32
2.10	AQUISIÇÃO DOS DADOS	32
2.11	ANSYS WORKBENCH	34
2.11.1	STATIC STRUCTURAL ANALYSIS MECHANICAL APDL SOLVER	35
3	METODOLOGIA	36
3.1	OBJETO DE ESTUDO	36
3.2	GEOMETRIA DO OBJETO DE ESTUDO	36
3.3	GERAÇÃO DA MALHA	37

3.4	CONDIÇÕES DE CONTORNO -----	40
3.5	ESTUDO DE CASO -----	41
4	RESULTADOS -----	43
5	CONCLUSÃO -----	47
5.1	TRABALHOS FUTUROS -----	47
	REFERÊNCIAS -----	48

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento das cidades, tornou-se necessário evoluir o setor da construção civil, atrelado a isso pessoas têm desenvolvido maneiras de otimizar o tempo, reduzir custos, melhorar a qualidade de vida, aumentar lucros, entre outras metas. Por este motivo, surgiu inúmeras tecnologias que servem para conciliar precisão e viabilidade econômica (TEIXEIRA, CARVALHO, 2005).

As vigas são consideradas elementos estruturais e mecânicos mais importantes na engenharia devido a sua ampla funcionalidade. Normalmente, são bastante utilizadas em estruturas de pontes, no apoio de pisos, em asas de aviões, eixos de automóveis, dentre outros elementos que acarretam imensos benefícios para a sociedade em geral (HIBBELER, 2010).

As vigas são elementos lineares, com duas dimensões de tamanho significativamente menor que a terceira dimensão, onde se predomina o esforço de flexão. Nas construções, as vigas funcionam como ponto de apoio para as lajes, transmitindo usualmente aos pilares os esforços recebidos. Também podem ser parte integrante de pórticos, ajudando a preservar a estabilidade global da estrutura (PELIZARO e CUNHA, 2017).

Desde os tempos remotos, o homem tem projetado instrumentos que vem sendo de real importância para reduzir seu esforço na execução de tarefas, com esse objetivo surgiram as primeiras pontes para facilitar sua passagem e sua locomoção de uma localização a outra. Com o desenvolvimento do concreto e do aço na construção de pontes foram se aprimorando e para isso vem sendo utilizados elementos estruturais de vigas até os dias atuais. Vale destacar que, com a construção dessas pontes possibilitou a facilidade e a rapidez no transporte (PINHO, 2007).

Com o passar do tempo, foram cada vez mais aperfeiçoando esses projetos, o avanço tecnológico possibilitou melhor compreensão de qual tipo de material seria necessário utilizar nessas construções, bem como a melhor forma de montagem. Esses avanços tecnológicos têm um papel fundamental no desenvolvimento da nação e, conseqüentemente, ao bem-estar social e econômico (SMIESKO, 2004; LOPES, 2007).

Quando se adentra as primeiras construções de pontes, é importante lembrar de um fator primordial para sua qualidade, as vigas, elas são consideradas os elementos estruturais e mecânicos mais importantes na engenharia devido a sua ampla funcionalidade. Com o estudo dessas vigas, é possível verificar, desde o material adequado a ser empregado, as dimensões que devem ser colocadas, bem como as reações que essas matérias sofrem ao longo do tempo,

com base nisso dar-se a importância de saber a deformação que as vigas sofrem ao passarem por qualquer tipo de esforço.

Segundo Pegden (1990), a simulação é um processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação.

Esse fator dar-se a sua importância, pois com esse experimento pode-se descrever o comportamento da viga, construir hipóteses e usá-lo para prever o comportamento futuro do material usado na viga.

As medições mecânicas, sensores de deformação ótica e extensômetro de resistência elétrica são algumas das ferramentas comumente utilizadas para a obtenção dos parâmetros de fundamental importância para o estudo da deformação (PAULA, 2015).

Sensores de deformação ótica possuem grande importância nesse estudo pois apresentam melhores resultados em relação à sensibilidade e ao tamanho, do que os sistemas tradicionais. Possuem também resistência à corrosão e resposta rápida. No entanto, apresentam custo elevado.

Extensômetros de resistência elétrica, também conhecidos como strain gauges, os extensômetros de resistência elétrica (ERE) são sensores constituídos de uma pequena e sensível grade composta de filamentos metálicos, que podem ser fixados diretamente na estrutura. Estes dispositivos são capazes de medir e transformar pequenas variações nas dimensões de uma viga metálica em variações de resistência elétrica, quando submetidos a uma deformação mecânica, sem comprometer as condições de serviço (FIGUEIREDO, 2006; PERTENCE JÚNIOR, 2010; BARRETO JÚNIOR, 2000).

Embora já existam múltiplas técnicas para a medição de deformação, é necessário adotar a que mais se adequa às características do sistema estrutural, apresentando maior nível de exatidão e baixo custo (SILVA, 2012).

Diante do exposto, esta pesquisa tem como proposta fazer a geração de uma viga no ANSYS Workbench 19.2 através da simulação numérica realizada nesse software, averiguar a variável de interesse, ou seja, a medição da deformação sofrida pela viga engastada, com os resultados numéricos obtidos, pretende-se confrontar com dados reportados no experimento e na literatura.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido em um momento que as simulações numéricas, ganha a cada dia maior importância, e onde o uso dos simuladores numéricos estão mais integrados no

aperfeiçoamento do uso das vigas em construções. Por isso, dar-se a importância de verificar a deformação sofrida por uma viga por meio do *software ANSYS*.

1.2 OBJETIVO GERAL

Avaliar a deformação sofrida por uma viga engastada via análise de estrutura por meio do *software ANSYS Mechanical*.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Fazer a geração de uma viga no *software ANSYS Mechanical*;
- Comparar os resultados teóricos com os resultados experimentais e com os resultados da simulação;
- Avaliar o desempenho do software para este caso;

1.4 ESCOPO DO TRABALHO

O trabalho realizado nesta monografia está organizado seguindo o seguinte formato:

No capítulo 2, será feito uma revisão a respeito das vigas e os métodos utilizados para a medição da deformação, bem como os principais benefícios;

No capítulo 3, será apresentado a malha da viga, o objetivo desta geometria e a apresentação do ANSYS Workbench, software no qual será implementado todos parâmetros. Além disso, será apresentado a forma como os valores experimentais da plataforma foram obtidos;

No capítulo 4, será apresentado os resultados da simulação numérica e suas comparações em relação aos ensaios experimentais e teóricos;

Por fim no capítulo 5, será apresentado as conclusões e contribuições obtidas, além de propostas de sugestões para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentado uma revisão com base em estudos científicos sobre uma viga sofrendo uma deformação ao ser submetida a um esforço. Além disso, será retratado os métodos utilizados para se obtê-la, bem como alguns dos principais parâmetros que devem ser levados em conta na sua análise.

2.1 MEDIÇÕES DE DEFORMAÇÃO

Quando uma força é aplicada a um corpo, tende a mudar a forma e o tamanho dele. Tais mudanças são denominadas deformação. Essa variação dimensional geométrica pode ocorrer tanto por forças, quanto por pressões, por momentos, por variações térmicas ou por alterações estruturais do material (HIBBELER, 2010; OMEGA, 2022).

De modo geral, a deformação de um corpo não se dá de forma semelhante em todo o seu volume, ou seja, a alteração na geometria de cada segmento de reta no interior do corpo pode variar ao longo de seu comprimento. Estas deformações podem ser causadas por tensão (expansão) e compressão (contração), as quais são diferenciadas por um sinal positivo e outro negativo, respectivamente (HIBBELER, 2010; OMEGA, 2022).

Quando um determinado corpo é submetido a duas forças opostas e se essas forças são dirigidas para fora do corpo, diz-se que o corpo é tracionado (Tração). No caso contrário, diz-se que a barra é comprimida, quando um corpo é submetido a ação de duas forças opostas dirigidas para dentro do corpo (CAPUTO, 1998).

Um dos primeiros aspectos a serem considerados em qualquer projeto estrutural é a tensão que leva o material à falha, ou ao colapso. Nesse sentido dar-se a importância de se realizar a análise da deformação de uma estrutura quando uma tensão mecânica é aplicada (PERTENCE JÚNIOR, 2010).

Os estudos de Análise do Sistema de Medição são importantes para a garantia da consistência nos processos produtivos, no sentido de avaliar a influência dos erros de medição na qualidade das decisões tomadas a partir dos dados coletados (FONSECA, 2008, p.3).

No decorrer dos anos, com os avanços tecnológicos foram surgindo diversos métodos para medir a deformação sofrida por um material, entre estes temos (PERTENCE JÚNIOR, 2010):

- **Os métodos mecânicos:** O conceito de medir traz, em si, uma ideia de comparação. Medir é comparar uma dada grandeza com outra da mesma espécie, tomada como unidade (SENAI, 1996). Neste método a deformação relativa da peça pode ser obtida

através do uso de um parafuso micrométrico. É importante saber, também, que os micrômetros se caracterizam pela capacidade e pela aproximação da leitura (CAVALARO, 2016) e para se medir é necessário ressaltar, a importância de se obter um valor com alto grau de precisão, com base nesse dar-se o motivo desse método não ser mais tão bem utilizado.

- **Os sensores de deformação ótica:** (Optical strain gauges): são métodos que podem ser sofisticados e de custo elevado exigindo, frequentemente, técnicas de processamento de imagens (PAULA, 2015).

Esse tipo de sensor oferece excelente vantagem quando comparados aos sistemas tradicionais por apresentarem melhores resultados em relação à sensibilidade e ao tamanho. Possuem resposta rápida, resistência à corrosão e sua medição é altamente precisa (SANTOS, 2018).

- **Os extensômetros de resistência elétrica:** Os extensômetro são usados para medir deformações em diferentes estruturas, a medida é realizada colocando um extensômetro nestas estruturas, convertendo a deformação causada em uma quantidade elétrica e amplificando-a em uma leitura em um local remoto. Os extensômetros fornecem um método excelente de converter deformações em quantidade elétrica. Estes possuem ótima versatilidade, possibilitando o uso em situações reais de operação, sejam elas estáticas ou dinâmicas e uma razoável relação custo/benefício (ANDOLFATO, CAMACHO, BRITO, 2004).

2.2 EXTENSÔMETROS DE RESISTÊNCIA ELÉTRICA (*STRAIN GAUGES*)

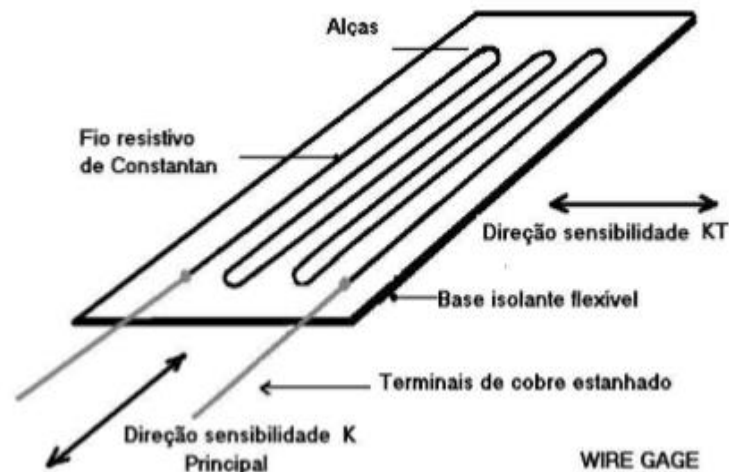
Desde 1940, o extensômetro resistivo (*strain gauges*) tem sido a ferramenta mais utilizada no campo de análise experimental de tensão e deformação. Isto porque este instrumento é o mais preciso, possui a maior sensibilidade, é versátil e o de mais fácil utilização, em comparação com outros sensores disponíveis para tal fim (WINDOW, 1982).

O extensômetro é um sensor que é colocado na superfície de uma peça, responsável por medir a deformação diante da aplicação de um carregamento. Essa técnica é muito utilizada para a verificação dos níveis de tensão atuante diante da condição de operação de um equipamento ou máquina (ENSUS, 2016).

Seu funcionamento dar-se por meio de um fio resistivo, que altera sua resistência de acordo com o “alongamento” da superfície em que está colocado, gerando dessa maneira sinais elétricos que são interpretados pela placa de aquisição, transformando os valores em

deformação (*Strain*). Os valores de deformação por sua vez podem ser convertidos em tensão mecânica (MPa). Os extensômetros são colados cuidadosamente na superfície das peças que devem estar totalmente limpas diretamente em contato com o metal base (ENSUS, 2016). A Figura 1 ilustra muito bem o modelo de um extensômetro de resistência elétrica:

Figura 1: Extensômetro de resistência elétrica.



Fonte: Ensus, 2016.

O extensômetro é baseado no fato de que os metais mudam sua resistência elétrica quando sofrem uma deformação (ANDOLFATO, CAMACHO, BRITO, 2004).

Uma das grandes adequações dos extensômetros de resistência elétrica é o fato de sua instalação poder ocorrer em equipamentos que trabalham sob condições operacionais reais. De forma que, os valores encontrados na medição são realmente correspondentes às verdadeiras deformações que estão atuando no decorrer do funcionamento da estrutura (MAIA, 1998).

2.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Os metais mudam de resistência quando submetidos a uma deformação. O princípio do funcionamento de um extensômetro pode ser compreendido analisando a resistência elétrica de um condutor cilíndrico de seção uniforme, conforme apresentado na Equação 1 (ANDOLFATO, CAMACHO, BRITO, 2004):

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1)$$

Nesta equação R representa a resistência elétrica do condutor, L o seu comprimento, A a área da seção transversal e ρ a resistividade do condutor que variará de acordo com a temperatura e a tensão mecânica aplicada.

Uma vez que a carga é posta nesse condutor, ocasionando tração ou compressão, a resistência sofrerá uma alteração em função das variações nas dimensões de comprimento, área e resistividade do material (LEUCKERT, 2000).

Assim, torna-se necessário o emprego de propriedades logarítmicas e a diferenciação em ambos os lados da Equação 1 para ocorrer a mudança na unidade de resistência, como demonstrado nas Equações 2, 3 e 4.

$$\text{Log } R = \log \left(\rho \frac{L}{A} \right) \quad (2)$$

$$\log R = \log \rho + \log L - \log A \quad (3)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(\frac{\Delta \rho}{\rho} \right) + \left(\frac{\Delta L}{L} \right) - \left(\frac{\Delta A}{A} \right) \quad (4)$$

Segundo Lima (2008), considerando que a área A da seção transversal do fio condutor seja proporcional ao quadrado do seu diâmetro D e que a variação relativa deste está diretamente relacionada à variação relativa do comprimento L , através do coeficiente de Poisson (ν) como representado nas Equações 5 e 6:

$$\nu = - \frac{\frac{\Delta D}{D}}{\frac{\Delta L}{L}} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta A}{A} = -2\nu \frac{\Delta L}{L} \quad (6)$$

Assim, substituindo a Equação 6 na Equação 4 a variação relativa da resistência passa a ser dada por:

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu) \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (7)$$

Dessa forma, relacionando a deformação (ε) com uma oscilação do comprimento L , a Equação 7 pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = (1 + 2\nu) + \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\varepsilon} \quad (8)$$

Segundo Magalhães (2003), a mudança na resistividade (ρ) ocorre na mesma proporção da variação do volume do material, onde c é uma constante desse material condutor determinada experimentalmente, como mostrado na Equação 9:

$$\Delta \rho = c\rho \left(\frac{\Delta V}{V} \right) \quad (9)$$

Finalizadas as reformulações matemáticas devidas na Equação 9 e substituindo-a na Equação 8, obtêm-se:

$$\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = (1 + c) + 2\nu(1 - c) \quad (10)$$

Os materiais resistivos usualmente utilizados na confecção de extensômetros elétricos, em sua maior parte, são ligas especiais onde o valor de c é unitário. Ao substituir esse valor na Equação 10, tem-se:

$$\frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} = 2 \quad (11)$$

Por fim, o valor encontrado na Equação 11 pode ser substituído por uma constante K , a qual indica o fator de sensibilidade o extensômetro, como mostrado na Equação 12:

$$\varepsilon = \frac{1}{K} \frac{\Delta R}{R} \quad (12)$$

A qual indica que a mudança relativa na resistência é proporcional a magnitude da deformação medida. Então, é desejável que o material resistivo tenha um valor da constante K sem correlação com a magnitude da deformação (ANDOLFATO, CAMACHO, BRITO, 2004).

2.4 CLASSIFICAÇÃO

Segundo Magalhães (2003), visto que existe diversos tipos de extensômetros com diferentes classificações, para se compreender melhor o funcionamento desses dispositivos, os modelos e suas particularidades, é necessário dividi-los em três aspectos: o material utilizado como elemento resistivo, o material utilizado como base e a configuração da grade (SELLI, 2015).

2.4.1 Material utilizado como elemento resistivo

O extensômetro de fio é constituído de fio resistivo, colados em um suporte, o qual serve para transmitir as deformações da peça em estudo, para o fio, que constitui o elemento sensível, e também deve isolar eletricamente esse fio (BARRETO JR., 1998).

Inicialmente os extensômetros de fio, eram constituídos de fios enrolados em uma bobina achatada, isto devido à falta de uniformidade dos fios de diâmetros menores de 0,025 mm, necessários para se obter extensômetros com alta resistência elétrica e tamanho menor que 6 mm. À medida que se melhorou a tecnologia de fabricação de fios muito finos, foi possível fabricar extensômetros de pequenos tamanhos, com o fio disposto em forma de "zig-zag" em um plano (WILSON, 2000).

Semelhantes aos de fio, os extensômetros de lâmina (*metal-foil strain gauges*) possuem uma diferença no processo de fabricação na qual se usa uma finíssima lâmina de uma liga resistiva da ordem de 3 a 10 μm . O primeiro extensômetro de lâmina foi fabricado na Inglaterra em 1952 por Saunders e Roe. Nos dias atuais são fabricados extensômetros de lâmina para os mais variados fins, com diversos tipos de grades, tendo vantagens sobre os de fios, além da versatilidade de fabricação, possuem uma área maior de colagem, permitindo uma diminuição da tensão no adesivo, obtendo-se assim deformação lenta e histerese bem menores. Outra vantagem é baixa dissipação térmica, menor que nos extensômetros de fio, sendo possíveis circuitos mais sensíveis, já que o nível de excitação do extensômetro depende da dissipação sua térmica. As lâminas são montadas em base de epóxi, tornando-se bastante flexíveis e permitindo uma colagem perfeita nas mais variadas superfícies (BARRETO JR, 1998).

2.4.2 Material utilizado como base

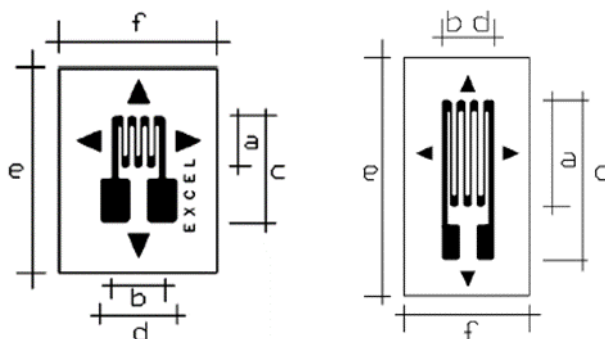
Os materiais utilizados são: papel, poliamida, poliéster e epóxi, onde cada um se encaixa de acordo com as especificidades e finalidades do extensômetro. (ANDOLFATO, CAMACHO, BRITO, 2004; LIMA 2008; BARRETO JR., 2000).

2.4.3 Configuração da grade

As grades também possuem uma diversidade considerável no mercado em relação a sua geometria e o seu tamanho (fator que não influencia na sensibilidade), onde podem ser encontrados, em sua maioria, como: uniaxial, biaxial e triaxial. Essa variedade permite que haja a distinção de acordo com a necessidade de medição específica (CARDOSO et al., 2017).

O extensômetro uniaxial simples, seja ele tradicional ou especial, é constituído por uma ou duas grades e costuma ser utilizado quando deseja-se obter medições de deformações nas direções de 45° e 90° (LIMA, 2008). Na Figura 2 exemplifica o modelo de um extensômetro uniaxial simples:

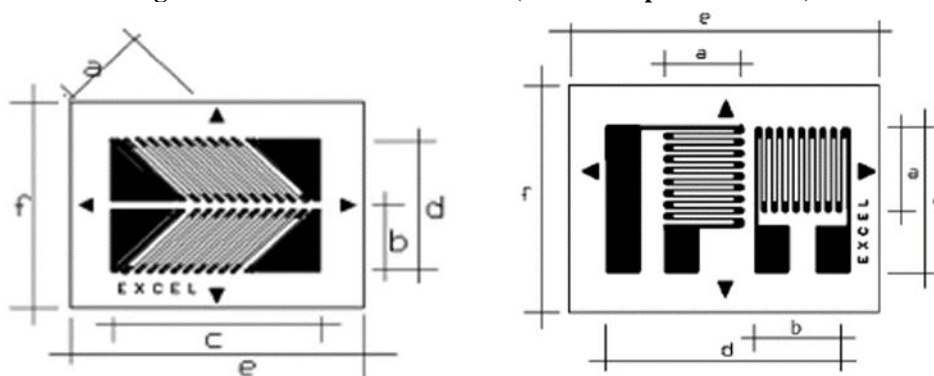
Figura 2: Extensômetros uniaxiais simples: modelos AB e BA.



Fonte: Excel Sensores, 2022.

Para medições em uma ou duas direções conhecidas, utiliza-se os extensômetros biaxiais ilustrado na Figura 3. O seu formato é de uma roseta dupla, a qual é composta por dois e sensores sobre uma mesma base (LIMA, 2008).

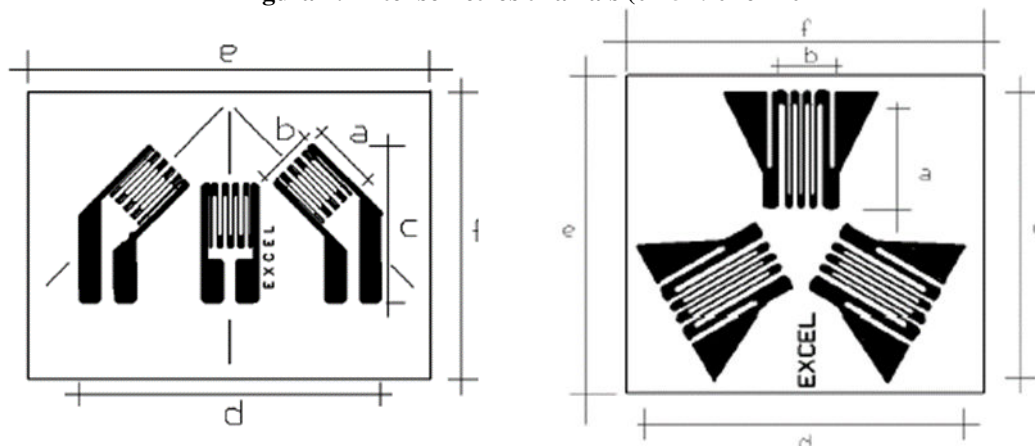
Figura 3: Extensômetros biaxiais (escama de peixe e de 90°.)



Fonte: Excel Sensores, 2022.

Já os extensômetros triaxiais, ilustrados na Figura 4, são utilizados quando deseja-se realizar medições em uma ou mais direções não conhecidas. Seu formato é de uma roseta tripla, composta por três extensômetros sobre uma mesma base sensível a deformação.

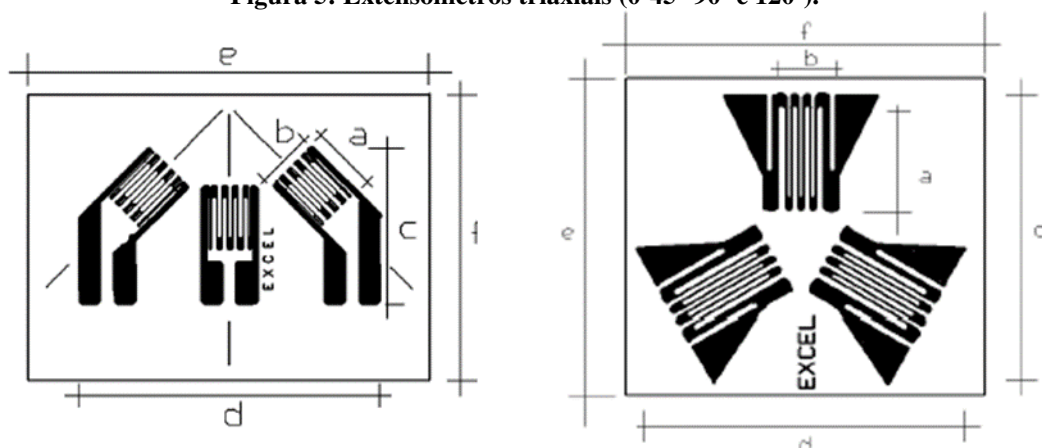
Figura 4: Extensômetros triaxiais (0-45°-90° e 120°)



Fonte: Excel Sensores, 2022.

Já os extensômetros triaxiais, ilustrados na Figura 5, são utilizados quando deseja-se realizar medições em uma ou mais direções não conhecidas. Seu formato é de uma roseta tripla, composta por três extensômetros sobre uma mesma base sensível a deformação.

Figura 5: Extensômetros triaxiais (0-45°-90° e 120°).



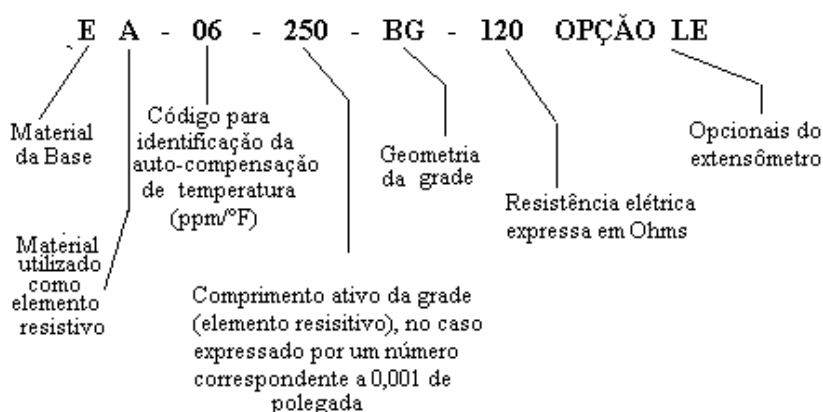
Fonte: Excel Sensores, 2022.

Diante do exposto, é importante salientar que a escolha do sensor com as características de acordo com o objetivo da medição é de extrema importância, afinal, uma vez escolhido o material inadequado a leitura poderá ser afetada e os dados não corresponderão com o esperado (GRANTE, 2004).

2.5 SISTEMA DE CODIFICAÇÃO

Cada fabricante adotou um sistema de codificação para facilitar a escolha do tipo de extensômetro, e esses sistemas de codificação possuem uma certa semelhança entre si. A seguir temos uma ilustração, de uma codificação adotada por um dos fabricantes de material para extensômetro (Figura 6).

Figura 6: Sistema de codificação dos extensômetros.



Fonte: Engenharia Elétrica – UFPR, 2000.

Os diferentes tipos de extensômetros disponíveis no mercado atendem requisitos diferentes de estados de deformação tais como, uniaxial, biaxial, triaxial ou ainda quadriaxial e

condições distintas como homogeneidade, não homogeneidade ou descontinuidade das tensões aplicadas à peça, cargas estáticas ou dinâmicas e condições em que a peça está submetida, como temperatura, umidade e pressão. Para a seleção correta do extensômetro é necessário verificar qual a dimensão que melhor atende a aplicação, visto que um extensômetro maior que o necessário irá resultar em medições errôneas (MINELA, 2017).

2.6 ESCOLHA ADEQUADA DO SENSOR

2.6.1 Dimensão

As dimensões do sensor são indicadas pelas letras a, b, c, d, e e f. Utilizando a Figura 4 como exemplo, é possível identificar claramente cada uma dessas referências. Os parâmetros são definidos como sendo: o espaço ocupado pela grade (a e b), o espaço da grade com seus terminais (c e d) e o espaço da base (e e f), onde todos esses agrupamentos representam comprimento e largura, respectivamente, de cada parte (EXCEL SENSORES, 2022).

2.6.2 Geometria da grade

A grade é a área responsável pela captação da deformação ocorrida na peça, logo sua escolha deve ser feita da forma mais adequada possível. Para as medições que ocorrem em apenas uma única direção ou em 2 (duas) direções conhecidas pelo aplicador, recomenda-se as configurações do extensômetro uniaxial e biaxial. No entanto, é preciso nesses 2 (dois) casos, que a geometria da grade seja posicionada de modo que a sua direção coincida com a mesma direção da deformação. Quando as direções de medições de deformações não são conhecidas o indicado é utilizar a configuração triaxial (MAGALHÃES, 2003).

2.6.3 Tipo de extensômetro

Para escolher o tipo do extensômetro deve-se considerar a aplicação e as condições que podem afetar durante a operação. Em medições estáticas o sensor deve possuir uma grande sensibilidade longitudinal, uma mínima sensibilidade transversal, baixa sensibilidade à temperatura e uma máxima estabilidade elétrica. Já em medições dinâmicas o extensômetro utilizado deve ser confeccionado com materiais que resistam bem à fadiga e possuam grande sensibilidade longitudinal (MAGALHÃES, 2003).

2.7 DETERMINAÇÃO DA DEFORMAÇÃO DE UMA VIGA SIMPLEMENTE ENGASTADA

A obtenção do valor teórico referente à deformação sofrida por uma viga flexível simplesmente engastada, quando submetida a uma força P , pode ser determinada partindo da Lei de Hooke para materiais, como representado na equação abaixo (BEER, 2011).

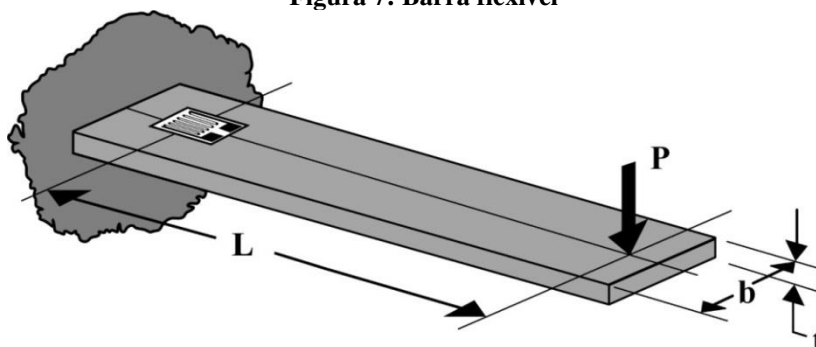
$$\sigma = \varepsilon E \quad (13)$$

Onde:

- σ = Tensão;
- ε = Deformação específica (adimensional);
- E = Módulo de elasticidade ou Módulo de Young;

Para continuar o entendimento da equação, faz-se necessário conhecer primeiramente os parâmetros da viga, os quais podem ser vistos com clareza através da Figura 7. A variável P representa a força aplicada na barra, L o comprimento do ponto de aplicação da força até o ponto onde estão inseridos os extensômetros de resistência elétrica, b representa a largura da barra, t a espessura e E o módulo de elasticidade da viga.

Figura 7: Barra flexível



Fonte: Santos, (2018).

Se uma viga de altura “ t ”, largura “ b ”, engastada em uma extremidade e submetida a um momento fletor “ M ”, a uma distância $y(t/2)$ do centro, aparece uma tensão longitudinal “ σ ” (WEBER, 2008). O momento de inércia e a distância y da barra é:

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad (14)$$

E o momento de inércia é:

$$I = \frac{bt^2}{12} \quad (15)$$

Neste caso para encontrarmos a deformação, é necessário se utilizar as Equações 13, 14 e 15 e isolar a variável pretendida, chegando a seguinte expressão:

$$\varepsilon = \left(\frac{(PL) \left(\frac{t}{2} \right)}{\frac{bt^3}{12}} \right) \left(\frac{1}{E} \right) \quad (16)$$

Por fim, fazendo a simplificação desta Equação 16 para se encontrar a deformação, a expressão da (ε) é obtida da seguinte maneira:

$$\varepsilon = \frac{6PL}{bt^2E} \quad (17)$$

2.8 CIRCUITOS

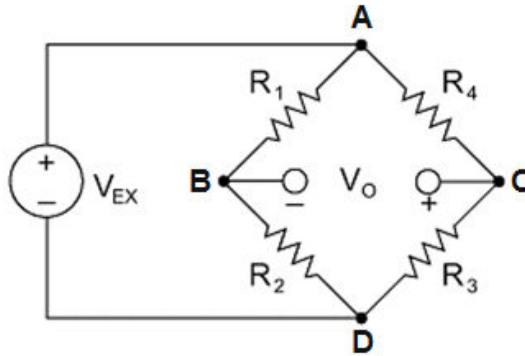
A ponte de Wheatstone é um circuito que, além de compensar resistores, se presta para medir variações relativas de resistência elétrica (WEBER, 2008).

Além disso, essa ponte de Wheatstone é um esquema de montagem elétrica caracterizado por um circuito em forma de ponte. É utilizado para medição de uma resistência de valor desconhecida. Foi desenvolvida por Samuel Christie em 1833, mas foi popularizado pelo Charlie Wheatstone que acabou ficando famoso com o esquema de montagem. A ponte proporciona elevada sensibilidade nas medições, sendo muito utilizada em medições com sensores (CONSONNI, NASCIMENTO, YOSHIOKA, GALEAZZO, 2020).

Utilizada para medir valores de resistência na faixa de 1 Ω a 1M Ω com precisões na ordem de $\pm 0,1\%$ a ponte de Wheatstone, ilustrada na Figura 8, é o circuito elétrico mais recomendado para avaliar as medidas de deformações utilizando o ERE no corpo de prova. Sua alta precisão para medidas de pequenas variações de resistência o torna essencial tanto para o ensaio estático, quanto para o dinâmico, afinal, sua função é a de converter uma pequena

mudança na resistência em tensão elétrica (ANDOLFATO, CAMACHO, BRITO, 2004; LIMA, 2008; NILSSON, 2008).

Figura 8: Ponte de Wheatstone.



Fonte: Instruments, 2017.

Ao analisar esse circuito de Wheatstone, para se obter o valor de V_0 (tensão do sinal de saída) utiliza-se a Equação 18:

$$V_0 = \left[\left(\frac{R_3}{R_4 + R_3} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \right] V_{EX} \quad (18)$$

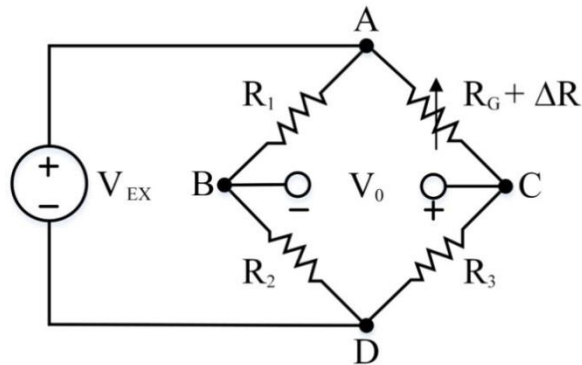
É importante lembrar que a condição de balanço só é obtida se a saída indicar uma tensão $V_0 = 0$ ou se a relação descrita na Equação 19 for verdadeira, na prática utiliza-se uma resistência variável no lugar de um dos resistores do circuito. Variando-se esta resistência o equilíbrio é determinado quando a corrente no medidor for zero.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (19)$$

2.8.1 Circuito com um extensômetro

Neste tipo de circuito pode-se operar com $\frac{1}{4}$ de ponte ativa, no circuito abaixo exemplifica como deve ser montado o circuito ponte de Wheatstone com um extensômetro, como é mostrado na Figura 9 (WEBER, 2008).

Figura 9: Ponte de Wheatstone com um extensômetro.



Fonte: Santos, 2018.

Onde R_G se refere à resistência do extensômetro. Assim:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_G$$

$$R_4 = R_G + \Delta R$$

$$\Delta R = K\varepsilon R_G$$

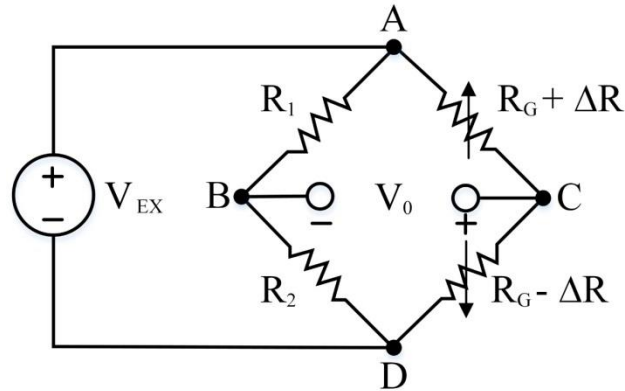
Considerando todas as características desta configuração e realizando todas as substituições das variáveis na Equação 18 obtêm-se a relação descrita na Equação 20:

$$\frac{V_0}{V_{EX}} = \frac{-\varepsilon K}{4} \left(\frac{1}{1 + \frac{K\varepsilon}{2}} \right) \quad (20)$$

2.8.2 Circuito com dois extensômetros

Esse tipo circuito é constituído por 2 (duas) resistências equivalentes R_i ($i = 1$ e 2) e 2 (dois) extensômetros, onde a resistência de um deles é dada por $R_G + \Delta R$ (sensor de tensão) e a outra resistência por $R_G - \Delta R$ (sensor de compressão). A Figura 10 apresenta a ponte Wheatstone com dois extensômetros:

Figura 10: Ponte de Wheatstone com dois extensômetros.



Fonte: Santos, 2018.

Para este caso as variáveis serão:

$$R_1 = R_2 = R_G$$

$$R_3 = R_G + \Delta R$$

$$R_4 = R_G - \Delta R$$

$$\Delta R = K\varepsilon R_G$$

Logo, substituindo as variáveis na Equação 18 e rearranjando as expressões é obtida a Equação 21:

$$\frac{V_0}{V_{EX}} = -\frac{K\varepsilon}{2} \quad (21)$$

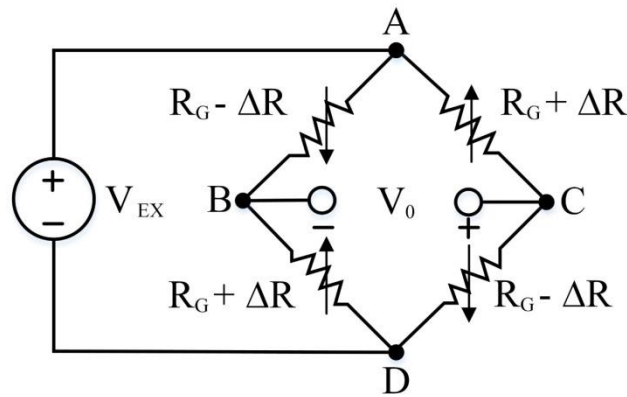
Para se encontrar a deformação, utiliza-se a Equação 22 da seguinte maneira:

$$\varepsilon = -\frac{2V_0}{KV_{EX}} \quad (22)$$

2.8.3 Circuito com quatro extensômetros

Neste tipo de circuito do tipo ponte completa todos os elementos resistivos são representados por extensômetros. Os sensores devem ser colados de maneira que as deformações sofridas sejam opostas, porém na mesma proporção. A Figura 11 apresenta a ponte Wheatstone com quatro extensômetros:

Figura 11: Ponte de Wheatstone com quatro extensômetros.



Fonte: Santos, 2018.

Com base nisso:

$$R_1 = R_3 = R_G - \Delta R$$

$$R_2 = R_4 = R_G + \Delta R$$

$$\Delta R = K\varepsilon R_G$$

Assim sendo, substituindo as variáveis na Equação 18 e realizando as adequações matemáticas, conclui-se a Equação 23 como:

$$\frac{V_0}{V_{EX}} = -K\varepsilon \quad (23)$$

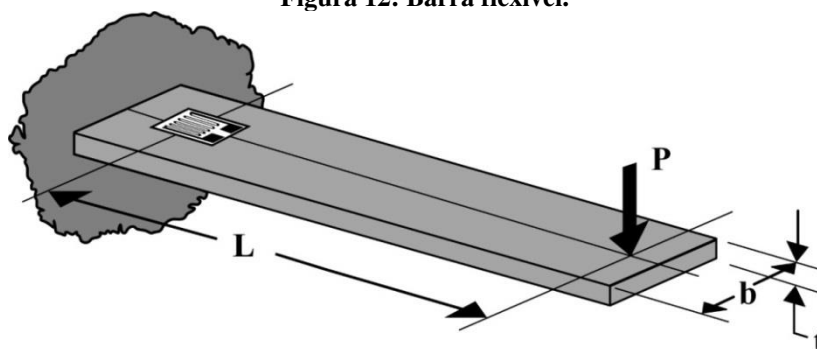
2.9 MÉTODO DOS QUATRO FIOS

O método de medição dos quatro fios é um método de medição muito preciso que pode medir resistência muito baixa com alta precisão. A ligação a 4 fios elimina completamente a influência dos condutores no resultado da medição, pois todas as possíveis assimetrias nas resistências dos condutores são compensadas, esse funcionamento despreza as resistências dos fios utilizados, evitando interferências (WIKA, 2017).

2.10 AQUISIÇÃO DOS DADOS

Nesta seção são apresentados os parâmetros necessários para a realização da simulação. Estes parâmetros foram capturados na literatura. A Figura 12 esquematiza uma viga com a exposição dos dados que serão aplicados no *software* ANSYS Workbench:

Figura 12: Barra flexível.



Fonte: Santos, 2018.

A viga flexível apresenta uma espessura (t) de 0,001m, uma largura (b) de 0,025m e um comprimento (L) do ponto de aplicação da força até o ponto onde estão inseridos os extensômetros de 0,235m. Ainda de acordo com a literatura, o material utilizado no ensaio experimental foi o aço inoxidável, cujo o módulo de elasticidade está contido na faixa de 190 GPa a 220 GPa. As forças aplicadas na viga variam entre 0,187 N até 1,587 N, conforme está exposto na Tabela 1:

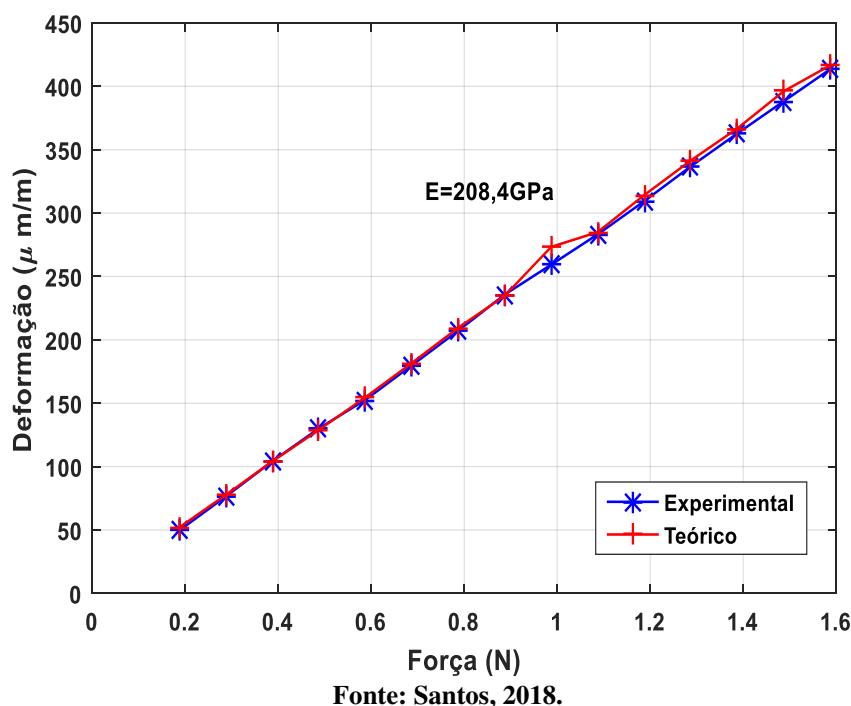
Tabela 1: Médias das deformações experimentais teóricas.

F(N)	$\epsilon_{exp}(\mu m/m)$	$\epsilon_{teo}(\mu m/m)$	Erro (%)
0,187	50,76329803	49,8435389	1,75
0,287	76,94989587	76,4551453	0,55
0,387	104,0760511	103,0667517	0,88
0,487	129,4444492	129,6783582	0,28
0,587	153,5455986	156,2899646	1,85
0,687	180,5928910	182,9015710	1,36
0,787	208,2962434	209,5131775	0,68
0,887	235,2858789	236,1247839	0,45
0,987	266,2684112	262,7363903	1,25
1,087	284,0992378	289,3479968	1,91
1,187	311,7139899	315,9596032	1,44
1,287	338,8912957	342,5712096	1,17
1,387	364,6982449	369,1828161	1,31
1,487	392,1241320	395,7944225	1,02
1,587	414,9736329	422,4060289	1,85

Fonte: Santos, 2018.

A partir dos valores dispostos na Tabela 1, foi plotado o gráfico da deformação em relação a força aplicada. O gráfico está representado na Figura 13:

Figura 13: Comparação entre os valores de medições experimentais e teóricas.



Com isso, após a obtenção dos resultados por meio dos métodos experimentais e teóricos, o módulo de elasticidade consiste em aproximadamente 208,4 GPa.

2.11 ANSYS WORKBENCH

Ao longo das últimas décadas, muitos programas comerciais tornaram-se disponíveis para a realização das simulações. Entre uma gama abrangente de soluções de simulação de elementos finitos fornecido pelas principais empresas de CAE, o ANSYS® Workbench é uma plataforma amigável projetado para integrar perfeitamente o conjunto de simulação de engenharia avançada da ANSYS, Inc. tecnologia. Oferece conexão bidirecional aos principais sistemas CAD. O ambiente Workbench é voltado para melhorar a produtividade e facilidade de uso entre os engenheiros equipes. Ele evoluiu como uma ferramenta indispensável para o desenvolvimento de produtos em um número crescente de empresas, encontrando aplicações em diversos campos da engenharia (CHEN, LIU, 2015).

O software ANSYS Workbench é uma plataforma de simulação que permite aos usuários modelar e resolver uma ampla série de problemas de engenharia usando simulações (CHEN, LIU, 2015).

Essa plataforma atende uma gama de tecnologias, tais como CFD, FEA (método dos elementos finitos) e ferramentas de otimização de Design. A plataforma é organizada usando guias e etapas para deixar a *interface* mais familiar ao usuário. Você inicia a página do projeto e o guia fornece-lhe o acesso às ferramentas que você precisa para ler na geometria, criar as condições de contorno (cargas, restrições, materiais), resolver o problema específico e criar resultados razoáveis de visualização (imagens e animações) e relatórios sobre os resultados (QUEIROZ, 2008).

2.11.1 STATIC STRUTURAL ANALYSIS MECHANICAL APDL SOLVER

A análise estática é usada para determinar deslocamentos, tensões e etc. Sob condições de carga estática, tem-se dois tipos de análises estáticas, a linear e não linear, sendo que as não linearidades podem incluir plasticidades, tensão, rigidez, grandes deformações, grandes tensões, superfície de contato e fissuração (CARBAJAL, 2002).

A análise estática de estruturas tem por objetivo principal quantificar a magnitude dos esforços internos e dos deslocamentos que se manifestam em qualquer sistema estrutural, quando o mesmo é submetido a um carregamento arbitrário, desprezando-se o efeito das forças de amortecimento e das forças de inércia. Tal procedimento no ANSYS fornece uma ampla gama de resultados numéricos, compatíveis com o carregamento aplicado, cuja avaliação de forma qualitativa viabilizará a sua utilização na elaboração do projeto da estrutura do sistema analisado (CARBAJAL, 2002).

3 METODOLOGIA

Este capítulo mostra as etapas realizadas nesta pesquisa, relacionadas ao estudo teórico da deformação de uma viga engastada via elementos finitos. Esse estudo será realizado por meio do *software* ANSYS Workbench cujo o modelo é o R19.2. Para executar esta simulação foi utilizado um notebook da marca Samsung, com memória de 4GB de memória RAM e HD 500 GB. Além disso, foi utilizado o “*Origin*” como ferramenta auxiliar para gerenciar os dados e plotar o gráfico (Força x Deformação). Devido a grande quantidade de valores necessitou-se utilizar o programa Excel a fim de encontrar a margem de erros.

3.1 OBJETO DE ESTUDO

O presente trabalho tem como objetivo principal realizar uma modelagem estrutural no *software* ANSYS Workbench, tendo por base elementos finitos, com o intuito de demonstrar, de forma clara e didática, a utilização do programa. Será descrito o procedimento de modelagem computacional de uma viga engastada com um suporte fixo e submetida a uma força variável na outra extremidade de modo a se verificar a deformação sofrida após aplicação da força.

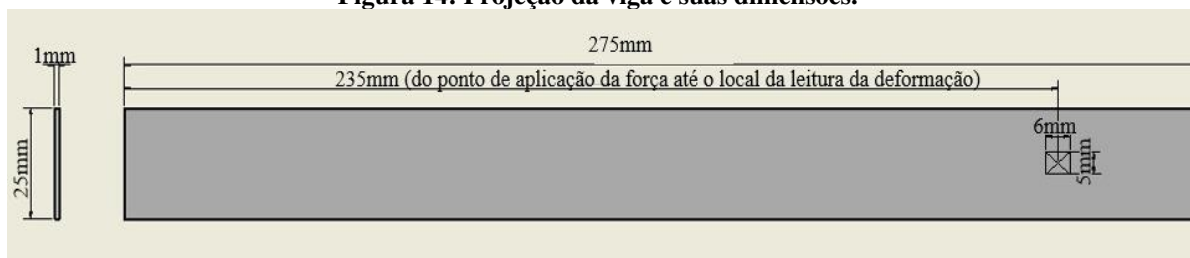
3.2 GEOMETRIA DO OBJETO DE ESTUDO

O *software* da ANSYS foi desenvolvido para proporcionar um ambiente no qual, vários tipos de simulações possam ser realizados, este atende uma gama de tecnologias, tais como CFD, FEA (método dos elementos finitos) e ferramentas de otimização de *Design* (QUEIROZ, 2008).

Este tópico será organizado por meio de etapas para deixar a *interface* mais familiar ao usuário. Primeiramente inicia-se a página do projeto, cada um dos sistemas de análise tem seu próprio procedimento, no entanto, existem alguns estágios comuns em todos os sistemas. Para iniciar a confecção da geometria e resolver o problema específico, esse guia fornece-lhe às ferramentas que você precisa para ler na geometria, criar as condições de contorno (carga, restrições, materiais, resolver o problema, criar os resultados almejados e relatórios sobre os resultados).

Baseado no método dos elementos finitos, o *software* ANSYS realiza os cálculos necessários para encontrar a deformação de uma viga quando submetida a uma força. A Figura 14 representa uma viga projetada no *software* bem como suas dimensões:

Figura 14: Projeção da viga e suas dimensões.



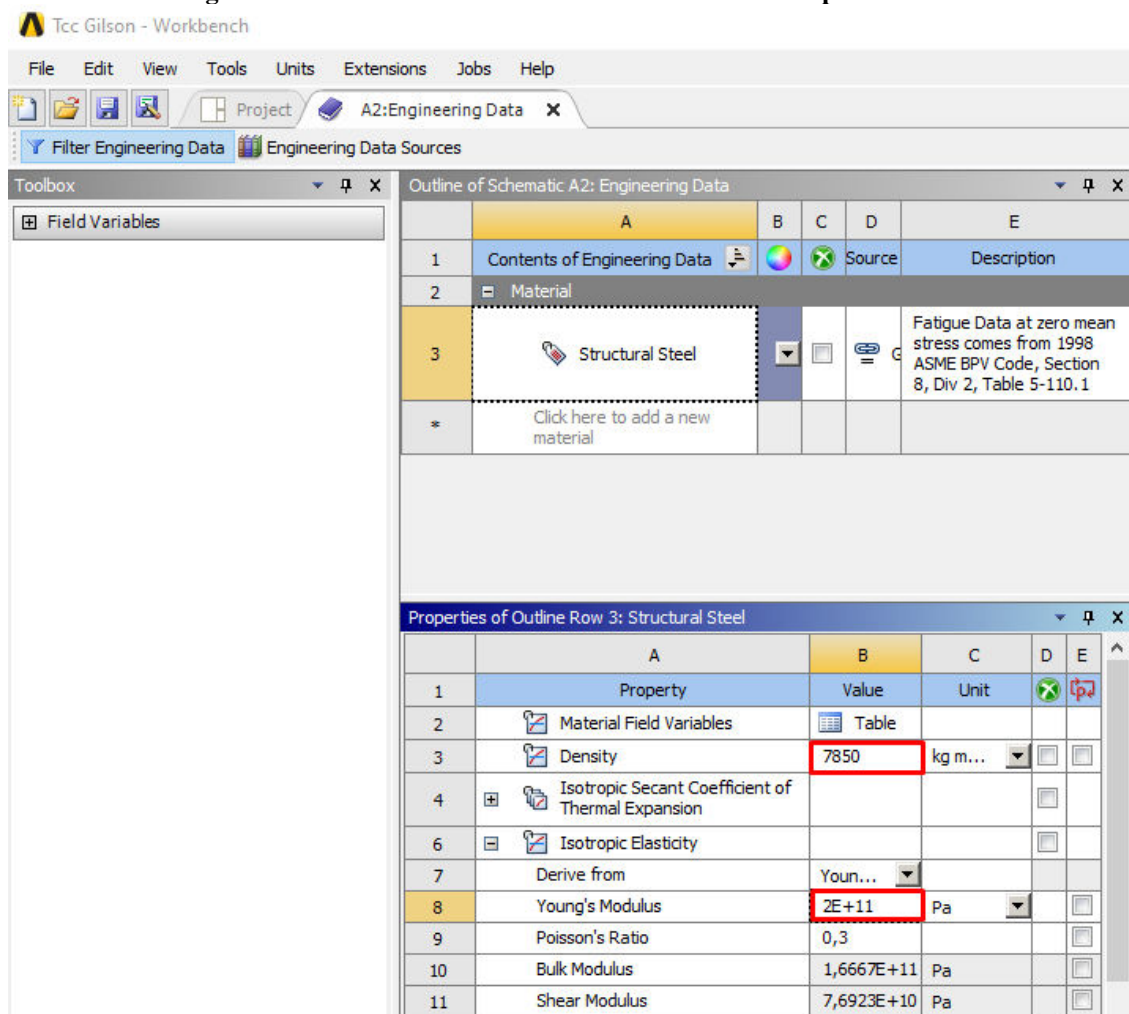
Fonte: Autoria própria.

3.3 GERAÇÃO DA MALHA

Para iniciar a modelagem, primeiramente clica-se no atalho do programa ANSYS Workbench, este abrirá uma janela na qual se escolherá, no item Toolbox, a opção ANSYS Static Structural; seleciona-se o diretório no qual serão salvos todos os arquivos gerados na modelagem, e no campo abaixo nomeia-se o arquivo de trabalho. Após realizado esses passos, clica-se no botão Geometry e após alguns instantes será inicializado a *interface* de modelagem.

Posteriormente é verificado o material contido na base de dados do *software*. No ambiente Static Structural, deve-se selecionar a opção “Engineering Data”. Figura 15 demonstra a *interface* mostrando o material usado pelo *software*, bem como o módulo de elasticidade, entre outras características:

Figura 15: Paineis com características do material usado pelo ANSYS.



Fonte: Autoria própria.

O material padrão utilizado pelo *software* consiste num aço estrutural cujo o módulo de elasticidade é $E=200\text{Gpa}$.

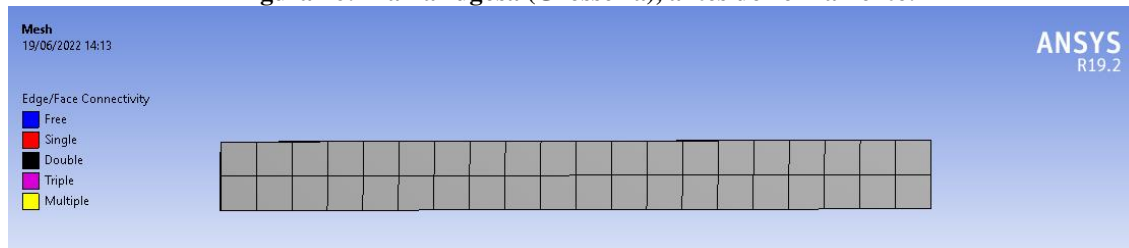
Após a construção da geometria, deve-se retornar ao ambiente Static Structural e nele é necessário selecionar, com o botão direito do mouse, a opção “Modal” e em seguida seleciona-se a opção “Editar” para iniciar o campo do “Mechanical”. Este ambiente possibilitará a adição dos parâmetros utilizados para a simulação, nos quais consistem em inserir um suporte fixo onde a peça será engastada como também determinar as forças que serão usadas.

Para uma melhor visualização da deformação do objeto de estudo dar-se a necessidade de um refinamento da malha.

O refino da malha se dá com o intuito de que os valores encontrados para a os deslocamentos, tensões e deformações sejam os mais próximos dos valores analíticos. Como outro objetivo referente ao refino da malha, pode-se citar uma melhor representação da

geometria do corpo analisado (FLÁVIO, 2015). A Figura 16 representa a estrutura em sua forma grosseira, ou seja, antes do refinamento:

Figura 16: Malha rugosa (Grosseira), antes do refinamento.



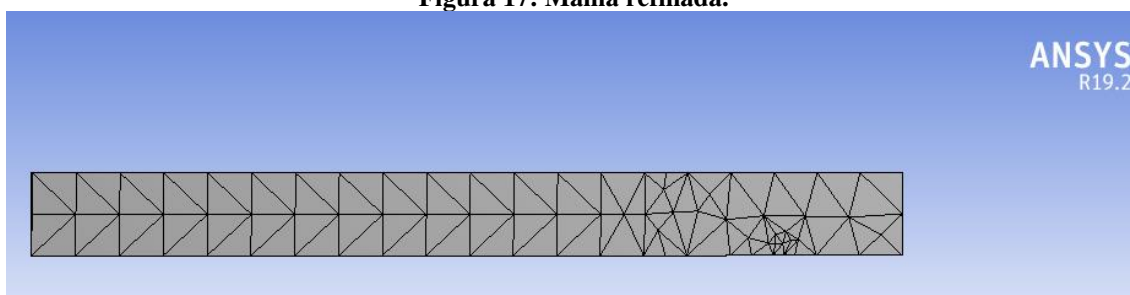
Fonte: Autoria própria.

Segundo Cunha (2014), é importante ter um controle da qualidade da malha para que se tenha um controle dos erros de discretização. Em outras palavras, para se obter soluções numéricas mais precisas é importante que se reduza a sua fonte de erros. Os erros de incerteza numérica não podem ser evitados, porém, podem ser minimizados. Tendo em vista a minimização desses erros, dar-se a importância do refinamento da malha.

Por fim, os nós, por ser o local o qual se obtêm os valores de deslocamento e subsequentemente valores referentes à tensão e à deformação, são de suma importância para as análises. Quanto maior o número de nós, maior o número de dados adquiridos, no entanto, leva consigo um maior esforço computacional para a solução numérica. Por tal razão, a quantidade de nós deve ser algo muito bem ponderado durante as análises, com o intuito de se obter uma qualidade de dados obtidos sem que se tenha um esforço computacional excessivo (FLÁVIO, 2015).

Quando se produz uma geometria no ANSYS e ter uma boa qualidade nas respostas dos dados buscados é necessário preocupar-se com o teste de convergência e com o número de elementos existentes na malha. Por este motivo, antes de se obter esses resultados, essa malha foi refinada, foi alterado o número de nós, a fim de se aumentar o número de elementos (partes) existentes na geometria e por fim, para concluir que os resultados estão tão próximos da realidade, a malha foi submetida ao teste de convergência. Para cada força aplicada na viga foi feito um novo teste de convergência e logo após a constatação de que a malha estava convergindo, foi anotado o valor da deformação sofrida.

Em síntese, para se obter resultados satisfatórios houve a necessidade de aumentar o número de nós existentes na malha e realizar o teste de convergência. A Figura 17 exibe o modelo final da geometria após o refinamento:

Figura 17: Malha refinada.

Fonte: Autoria própria

3.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO

ANSYS é um pacote de análise de elementos finitos o *software* usa esse método de elementos finitos para resolver as equações governantes subjacentes e as condições de contorno específicas dos problemas associados.

A ideia básica do Método dos Elementos Finitos consiste em utilizar como parâmetros as variáveis nodais de um número finito de pontos previamente escolhidos, denominados de nós. No MEF o domínio de integração é subdividido em uma série de regiões, ou elementos finitos, interconectadas entre si através de um número discreto de pontos nodais. Para cada região (ou elemento) se estabelece um comportamento local aproximado, de tal forma que as incógnitas do problema em qualquer ponto do elemento podem ser definidas em função das mesmas incógnitas nos pontos nodais do elemento. Em seguida, minimizando o funcional do problema, obtido das somas das contribuições de cada elemento, se chega a um sistema total de equações, cuja solução permite conhecer os valores das incógnitas nos pontos nodais. Finalmente a partir desses valores pode-se calcular outros resultados intermediários (CARBAJAL, 2002).

A utilização do MEF no âmbito das Engenharias, tem como objetivo a determinação de deslocamentos, estado de tensão e deformações de uma dada estrutura, quando esta está submetida a uma determinada ação externa, a partir desses dados, uma série de outros podem ser determinados, o que torna o método eficiente (FLÁVIO, 2015).

A solução de qualquer problema pelo método dos elementos finitos consiste em 3 etapas.

- **Pré-processamento:** Onde define-se o tipo de geometria do problema, tipo de análise, a malha, propriedades dos materiais, as variáveis de entrada, o tipo de elemento e as condições de contorno.

- **Processamento:** O tipo de solução a ser empregada, o que se deseja encontrar na análise e como o carregamento deve ser aplicado.
- **Pós-processamento:** Nessa etapa se pode obter os resultados tais como, tensões, convergência, valor da deformação.

3.5 ESTUDO DE CASO

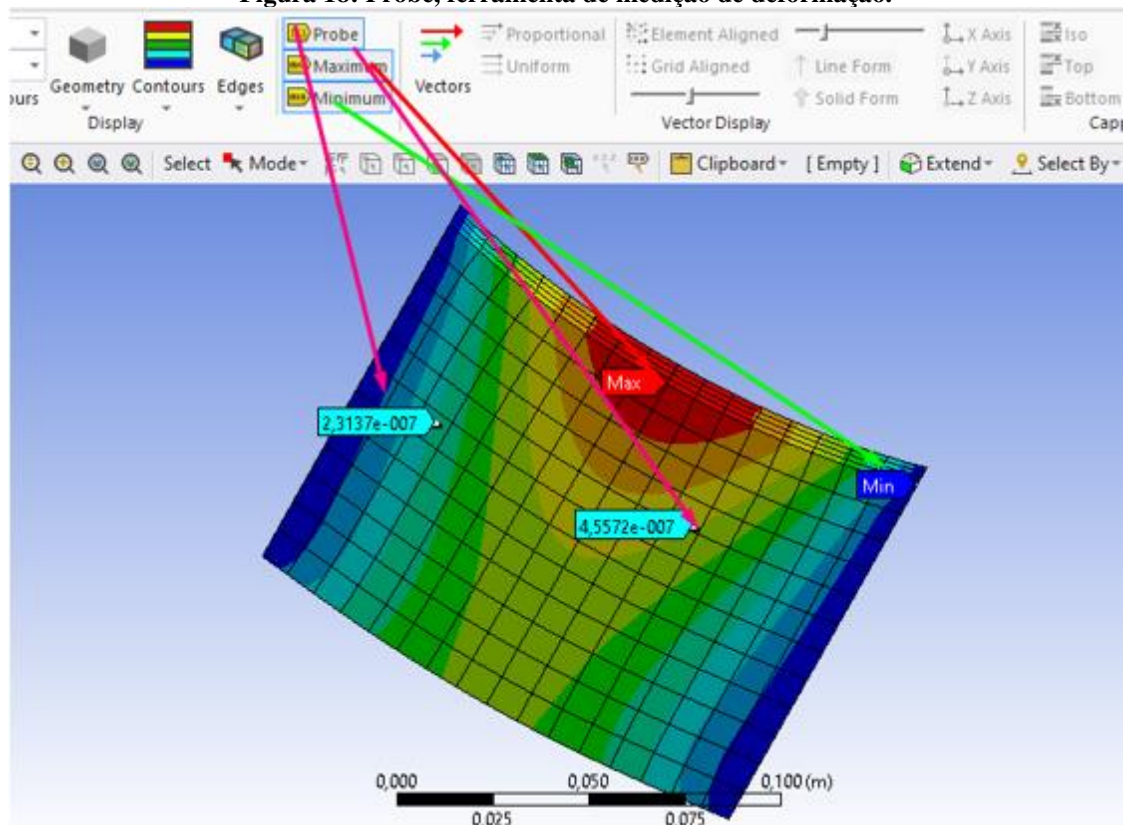
A partir da plataforma experimental, foi confeccionado uma viga no ANSYS e a partir disso, aplica-se uma força em uma das extremidades da viga a fim de analisar a deformação sofrida por esse objeto. É importante ressaltar que após a aplicação da força é possível se analisar a deformação que a viga estava sofrendo.

Como já apresentado no trabalho, a partir do experimento, foi montado o modelo no já mencionado *software* ANSYS Workbench, versão *R19.2* que pudesse prever o comportamento visto nos experimentos.

De modo geral, para a elaboração do arranjo estrutural, os seguintes aspectos gerais foram considerados:

- Foram selecionadas todas as características da viga experimental como: a largura (m), a altura (m), o comprimento (m), a força aplicada (N) e a distância do ponto de aplicação da força até o local de leitura da deformação (m);
- O material padrão utilizado pelo *software* consiste num aço estrutural cujo o módulo de elasticidade é $E = 200 \text{ Gpa}$.
- Foi utilizado $F_i = 0,187 \text{ N}$ variando até $F_f = 1,587 \text{ N}$;
- Após a implementação da malha, foi utilizado um instrumento de medição que pudesse medir a deformação da viga do ponto de aplicação da força até o local da leitura. Este instrumento, denominado “*probe*”, serve para medir com precisão a deformação da viga com o objetivo de proporcionar uma melhor precisão dos resultados. A Figura 18 evidencia sua localização no ambiente de simulação:

Figura 18: Probe, ferramenta de medição de deformação.



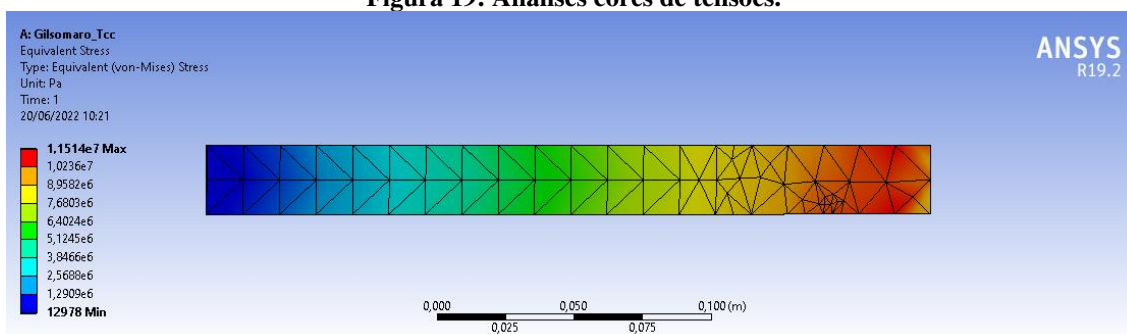
Fonte: Adding probes in ANSYS® Mechanical, 2022.

4 RESULTADOS

Este capítulo aborda análises de tensões e deformações totais onde estas tensões e deformações mais baixas se encontram na região azul e as mais altas se encontram na região vermelha. Além disso, ele apresenta a comparação entre os resultados obtidos dos ensaios experimentais e dos resultados teóricos com os resultados da simulação a fim de verificar a semelhança entre os mesmos.

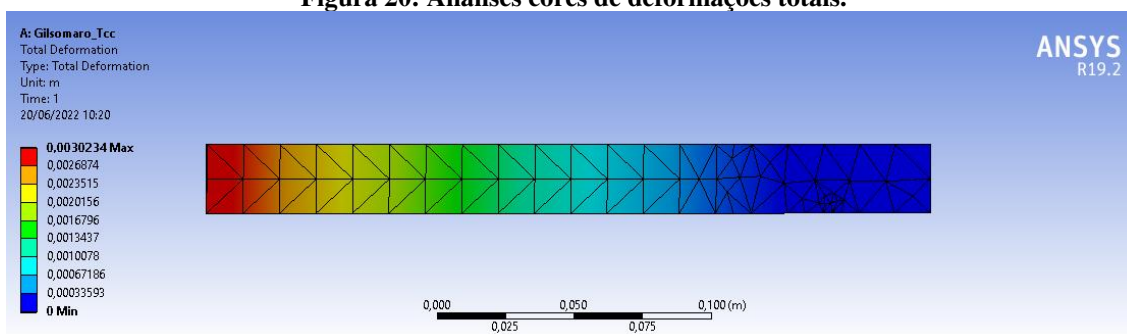
Na Figura 19 e Figura 20, pode-se observar os valores mínimos e máximos das tensões e das deformações totais na qual a viga estava sofrendo quando submetida a ação de uma força y :

Figura 19: Análises cores de tensões.



Fonte: Autoria própria.

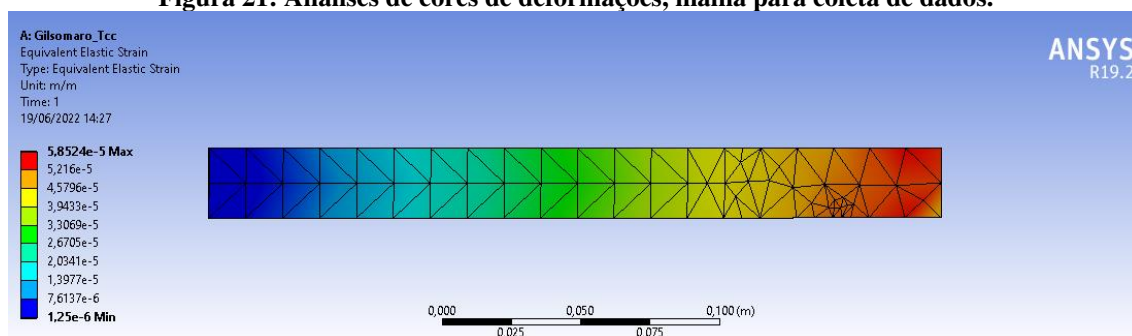
Figura 20: Análises cores de deformações totais.



Fonte: Autoria própria.

Para comparar os resultados, coletou-se os valores das deformações que a viga estava sofrendo do ponto de aplicação da força até o local de leitura e foi montado uma tabela com esses resultados. A Figura 21 mostra a malha que foi coletada os dados bem como o gradiente de cores:

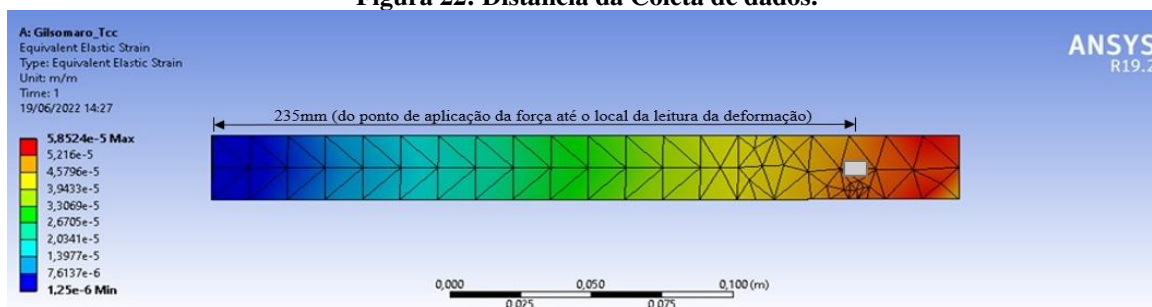
Figura 21: Análises de cores de deformações, malha para coleta de dados.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 22 mostra a distância entre o ponto de aplicação da força até o local da leitura da deformação:

Figura 22: Distância da Coleta de dados.



Fonte: Autoria própria.

Por meio da Tabela 2 é possível averiguar e concluir a despeito dos resultados adquiridos. Foi relacionado nessa tabela os valores das forças aplicadas a cada situação, os valores médios que se remetem aos ensaios experimentais e aos teóricos, e os valores obtidos pela simulação numérica, a fim de verificar a semelhança entre eles. Além disso, foi analisado o percentual de erro desses resultados. Esses erros percentuais foram obtidos através dos resultados experimentais em relação aos resultados da simulação numérica.

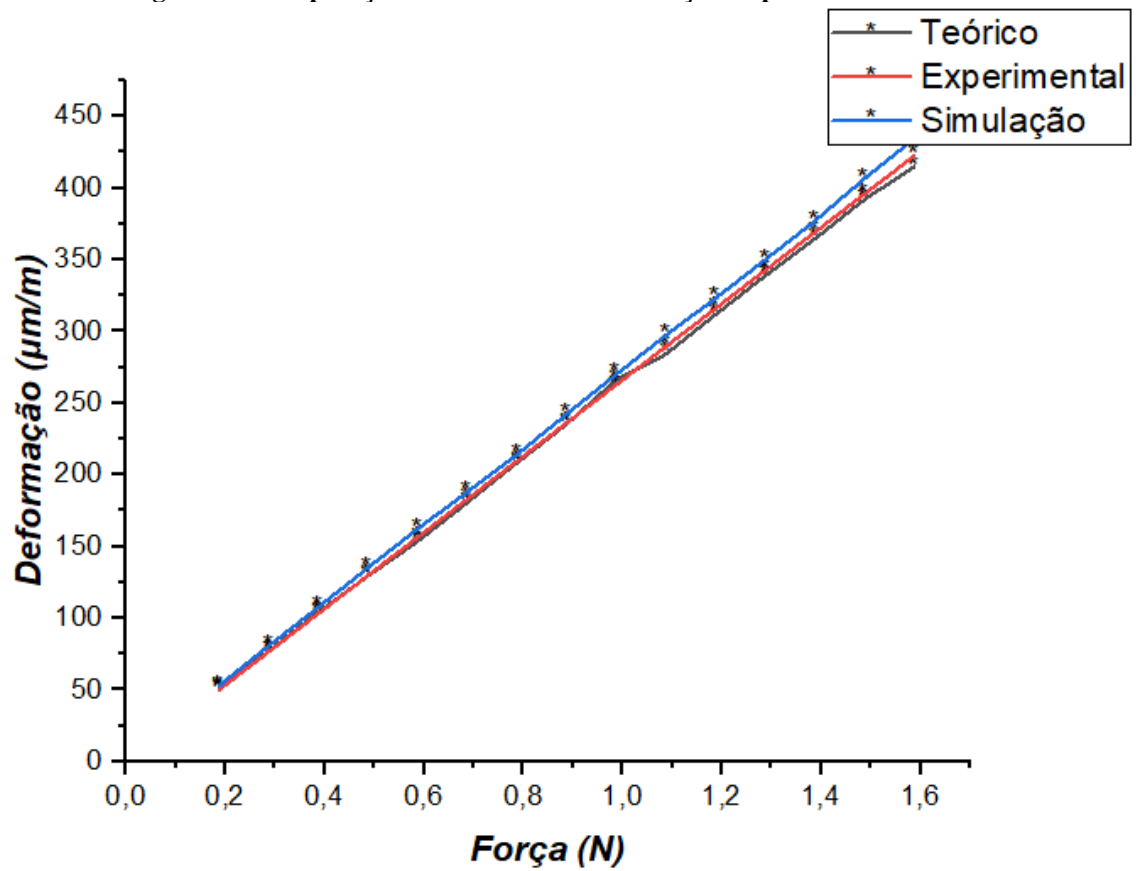
Tabela 2: Médias das deformações experimentais e teóricas em comparação com a simulação.

F (N)	$\epsilon_{exp} (\mu m/m)$	$\epsilon_{teo} (\mu m/m)$	$\epsilon_{Simulação} (\mu m/m)$	Erro (%)
0,187	50,763	49,84	52,666	3,75
0,287	76,95	76,46	80,492	4,6
0,387	104,08	103,1	107,57	3,36
0,487	129,44	129,7	135,12	4,38
0,587	153,55	156,3	162,19	5,63
0,687	180,59	182,9	187,96	4,08
0,787	208,3	209,5	213,92	2,7
0,887	235,29	236,1	242,17	2,93
0,987	266,27	262,7	269,96	1,39
1,087	284,1	289,3	297,15	4,59
1,187	311,71	316	323,06	3,64
1,287	338,89	342,6	350	3,28
1,387	364,7	369,2	377,04	3,38
1,487	392,12	395,8	406,52	3,67
1,587	414,97	422,4	434,55	4,72

Fonte: Autoria própria, 2022 e Santos, 2018.

Por meio do gráfico constata-se que em ambos os métodos os valores de deformação foram bem próximos e linearmente proporcionais aos valores da força peso. Logo, os três métodos são confiáveis e podem ser utilizados nas medições de deformação. O gráfico da Figura 23 demonstra a comparação entre os valores teórico e práticos, com os valores da simulação.

Figura 23: Comparação entre os valores de medições experimentais e teóricas.



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, desenvolveu-se uma simulação numéricas, contendo uma barra flexível simplesmente engastada, um atuador de força e um suporte fixo. A fim de analisar a sua deformação por meio do *software* ANSYS, e a partir disso se comparar os resultados obtidos com os valores referentes a deformações medidas de forma experimental e teórica.

Tendo em vista esse objetivo, foi gerado no ANSYS, um modelo computacional que utiliza o método dos elementos finito para encontrar as deformações sofridas pela viga. Através dos valores informados concluiu-se que os valores obtidos na simulação apresentam deformações muito semelhantes aos ensaios experimentais e do cálculo teórico. Com isso, observou-se que esse *software* se mostrou muito eficiente para a implementação deste modelo.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Como forma de enriquecer esse trabalho e obter medidas com maior precisão e exatidão, sugere-se, como trabalhos futuros:

- Inserir um ponto de identificação na viga, afim de identificar com mais precisão o local de medição até o local onde a força está sendo aplicada;
- Refazer essa mesma geometria no ANSYS APDL e tentar encontrar a deformação. Pois nesse modelo é possível se mudar os dados no próprio arquivo de texto, sem a necessidade de manusear a interface do software, dessa forma reduzira o tempo de construção da malha e sobrecarregara menos o computador.

REFERÊNCIAS

- ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; BRITO, G. A. de. **Extensometria Básica**. Ilha Solteira - SP, Brasil, 2004. Acesso em 10 março 20122. Disponível em: <<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometria-basica.pdf>>.
- BARRETO, J. **Extensometria: Manual Prático**. 73 f Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira –SP, Brasil, 2000.
- BEER, F. P. et al. **Mecânica dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda, 2011.
- BEST BLOG CONTENTS. **Minimum And Maximum Probes In ANSYS® Mechanical**. Disponível em: < <https://mechanicalland.com/minimum-and-maximum-probes-in-ansys-mechanical/>>. Acesso em: 05 mai. 2022.
- CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6ª Edição. Rio de Janeiro: JC EDITORA, 1998.
- CAVALARO, Darlan. **Metrologia e Mecânica Básica**. SENAI(CUTIBA/PR), 2016.
- CARDOSO, A. C. S.; CHAHUB, E; GUIMARAES, J. M. S; BRANCO, L. A. M. N; OLIVEIRA, T. S.; PEREIRA, C. G. A.; SANTOS, K. O.. **Extensômetros elétricos de resistência**: definições e aplicações na construção civil. v. 635, p. 82-85, São Paulo, 2017.
- CONSONNI, D; NASCIMENTO, V; YOSHIOKA, L; GALEAZZO, E. **Laboratório de Instrumentação Elétrica**. Apostila de um Experiência 1-Ponte de Wheatstone, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2018. Acesso em 09maio2022.Disponivelem<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5518328/mod_resource/content/4/Exp%2001%20%20Introdu%C3%A7%C3%A3o%20Te%C3%B3rica%20%20Pont%20de%20Wheatstone%20v%202020%20rev_1.pdf>.
- CASTRO, E. C. **Procedimento para Análise Numérica com Software Ansys de uma Viga em Flexão com a Forma T**: Procedure for the numerical analysis of the deflection behavior of a T-beam using the software ANSYS. 2017. Acesso em 05 maio 2022. Disponível em: <[file:///C:/Users/gilso/Downloads/ljuvencia30,+46511-Texto+do+artigo-203177-1-10-20170811%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/gilso/Downloads/ljuvencia30,+46511-Texto+do+artigo-203177-1-10-20170811%20(1).pdf)>.
- CHEN, B. X; LIU, Y. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. **2ª Edição, 2015**.
- ENSUS. **Advanced endineering**. Disponível em: < <https://ensus.com.br/extensometria-strain-gauge-o-que-e-quando-utilizar/>>. Acesso em: 04 mai. 2022.
- EXCEL SENSORES (São Paulo). **Extensômetros de resistência elétrica**. Disponível em: <<http://www.excelsensor.com.br/>>. Acesso em: 05 mai. 2022.
- ENGENHARIA ELÉTRICA – UFPR (Paraná). **Sistema de codificação dos extensômetros**. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/2000/wilson/f.htm>>. Acesso em 05 maio 2022.

FIGUEIREDO, E. J. F. **Monitorização e avaliação do comportamento de obras de arte**. 2006. 191 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2006.

FONSECA, M. P. **A análise do sistema de medição (MSA) como ferramenta no controle de processos em uma indústria de dispositivos médicos descartáveis**. Monografia. Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Juiz de Fora. 2008.

FLÁVIO, P. G. M. **Simulação Numérica de Banco Veicular Dianteiro: Impacto Traseiro**, Faculdade gama Universidade de Brasília, 2015. Acesso em 05 maio 2022. Disponível em: <https://fga.unb.br/articles/0001/0188/Paulo_Marques_TCC2.pdf>.

GUILHERME, J. **Extensometria (Strain Gauge)**, 2016. Acesso em 14 abril 2022. Disponível: <<https://ensur.com.br/extensometria-strain-gauge-o-que-e-quando-utilizar/#:~:text=O%20extens%C3%B4metro%20ou%20strain%20gauge,de%20um%20equipamento%20ou%20m%C3%A1quina>>.

GRANTE (Grupo de Análise e Projeto Mecânico). **Apostila de Extensometria**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7ª Edição. São Paulo: PEARSON, 2010.

INSTRUMENTS, National. **Medições de deformação com Strain Gauges**. 2017. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/3642/pt/>>. Acesso em: 05 maio 2022.

LIMA, W. M. **Plataforma para Análise Comportamental de Atuadores de Ligas com Memória de Forma e para o Controle de Deformação de uma Barra Flexível**. Dissertação (Mestrado). Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2008.

LEUCKERT, C. **Sistema Portátil de Aquisição de Dados para Análise Dinâmica de Estruturas Mecânicas**. 7–25 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica) — (UFRGS, Porto Alegre - RS, Brasil, abril de 2000. Acesso em 9 maio 2022. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/ppgee/tese-eng-0307559.pdf.gz>>.

LECKER, T. D. **Análises de Tensões em Vasos de Pressão através do Método dos elementos Finitos**. Dissertação (Dissertação de Bacharel em Engenharia Mecânica) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ, 2014. Acesso em 05 maio 2022. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/JernimoJunior/anlise-tenses-vasospressopormef>>.

NILSSON, J. W; SUSAN A. R. **Circuitos Elétricos**. 8ª. Ed; Prentice Hall/Pearson; 2008.

MEDEIROS. Gian Paulo. **CPM - Programa de Certificação de Pessoal de Manutenção: Metrologia básica - Mecânica**. SENAI (ESPIRITO SANTO), 1996.

MAIA, N. S.; **Estudo analítico experimental de tensões em um desaerador de uma usina termelétrica**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, 1998.

MINELA, S. N. **Extensometria: Estudo e aplicação**. 2017. Dissertação (Bacharel) – Curso de Engenharia Automotivo, Faculdade da Universidade Federal de Santa Catarina de Joinville, 2017.

MAGALHÃES, E. P. **Comportamento Experimental de uma Cortina de Estaca Prancha Assente em Solo Poroso do DF**. 72–89 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Geotecnia), Universidade de Brasília, Brasília - DF, Brasil, maio de 2003.

OMEGA, E. **Sensores de deformação**. Disponível em: <<https://br.omega.com/prodinfo/sensores-de-deformacao.html>>. Acesso em: 10 Mar. 2022.

PELIZARO, T. V. G; CUNHA, J. **Estudo do Pré-dimensionamento de Lajes, Vigas e Pilares de concreto**. Artigo, Universidade Federal de Uberlândia, 2017.

PEGDEN, C.D., SHANNON, R.E., SADOWSKI, R.P. **Introduction to Simulation Using SIMAN**, McGraw-Hill, New York, USA. v. 2. 1990.

PAULA, I. B. **Medição de Deformação e Força**: Rio de Janeiro: Notas de Aula, 2015. 25 slides, color.

PERTENCE, J. A. **Extensômetros em engenharia civil: Teoria e aplicações**. CONSTRUINDO (MINAS GERAIS), v.2, n.1, p.24-26, jan./jun. 2010.

CARBAJAL, Maxwell Abrahan Vargas. **Análises de estruturas via Ansys**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2002. Acesso em 05 maio 2022. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/5111/5111_3.PDF.

QUEIROZ, N. F. **Tutorial Ansys Workbench 11.0**: Simulação com CFD de escoamento de fluxo ao redor de um edifício de 10 andares. Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, 2008.

SILVA, W. J. S. **Monitoração estrutural e instrumentação virtual aplicados ao ensino experimental de engenharia civil**. In: **XL Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**. Belém: COBENGE, 2012. 12 p.

SANTOS, M. A. B. **Plataforma para análise da deformação de uma viga simplesmente engastada**. 2018. Dissertação (Bacharel) – Curso de Ciência e Tecnologia, Faculdade do Rio Grande do Norte – UFERSA, Caraúbas, 2018.

SELLI, R. **Análise experimental de estruturas utilizando extensômetros elétricos**. 2015. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul/RS, 2015.

TEIXEIRA, L. P., & Carvalho, F. M. A. d. (2005). **A construção civil como instrumento do desenvolvimento da economia brasileira**. Revista Paranaense de Desenvolvimento, (109), p. 9-26.

WINDOW, A. L; HOLISTER, G. S. **“Strain Gage Techonolgy Applied”**, Science Publishers, London em New York, 1982.

WILSON. **Tipos de extensômetros**. UFPR (CURITIBA/PR), 2000. Acesso em 10 maio de 2022. Disponível: < <http://www.eletrica.ufpr.br/edu/Sensores/2000/wilson/d.htm>>.

WEBER, A. L. **Metrologia e instrumentação**. Universidade de Caxias do Sul, Rio Grande do sul, 2008.

WIKA, A. W. **Pt100 com ligação a 2, 3 ou 4 fios**. 2017. Acesso em 09 em maio2022.Disponívelem:<<https://onedrive.live.com/view.aspx?resid=F026B43C8CBF68C0!9193&ithint=file%2cdocx&authkey=!AlpIDEIj6LRG8xo>>.

WEAVER, J, W; JOHNSTON, P. R. **Finite Elements for Structural Analysis**. Ed. Englewood Cliffs, New Jersey. 1984.